

# Bionika w rozwoju inżynierii produkcji

## Bionics science for development of production engineering

ADAM RUSZAJ \*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.5-6.86

Organizmy żywe przystosowały swoją budowę i pokrycie ciała do bezpiecznego i racjonalnego realizowania podstawowych czynności życiowych. Wiele z tych patentów natury może być inspiracją do rozwiązywania problemów inżynierskich. Przedstawiono przykłady wykorzystania bioinspiracji w rozwoju inżynierii produkcji.

**SŁOWA KLUCZOWE:** bionika, właściwości warstwy wierzchniej, odporność na zużycie, wytrzymałość zmęczeniowa

*Living organisms have developed their structures and coverings of their bodies to meet the safe and sparing life supporting operation requirements. Many of these systems could readily inspire solutions to engineering problems. Presented are the examples of bio-inspirations found effective in solving production engineering problems.*

**KEYWORDS:** bionics, surface layer properties, wear resistance, fatigue strength

Bionika to interdyscyplinarna nauka, która bada żywe organizmy (rośliny, zwierzęta) oraz materiały i procesy występujące w środowisku naturalnym pod kątem możliwości wykorzystania w technice rozwiązań wypracowanych przez naturę [1÷5]. Człowiek od początku swojej historii podglądał zjawiska przyrody i żywe organizmy – uczył się od nich, jak przetrwać. Dzięki rozwojowi nauki i techniki takie obserwacje są bardziej precyzyjne, a wnioski z nich wyciągane znajdują szerokie zastosowanie w niemal każdym obszarze nauki i techniki. Wpływ bioniki na ludzkie życie jest bardzo duży.

Przez wiele lat ludzkość była zafascynowana własnymi osiągnięciami technicznymi. Bionika uczy szacunku dla rozwiązań wypracowanych przez naturę, a tym samym uświadamia człowiekowi, że powinien chronić środowisko naturalne, ponieważ jest z nim nierozzerwalnie związany. Nauka ta integruje badaczy różnych dziedzin i wytycza kierunki rozwoju cywilizacji.

### Bionika a inżynieria produkcji

Według danych literaturowych na świecie żyje ok. 55 000 gatunków ssaków, 31 000 gatunków ryb, 10 000 gatunków ptaków, 8 800 gatunków płazów, 1 000 000 gatunków owadów i 300 000 gatunków roślin. Wiele z nich może posłużyć jako wzór do projektowania materiałów, kształtów lub struktur obiektów mechanicznych, warstwy wierzchniej oraz różnorodnych procesów technicznych [1÷3]. Z analizy opublikowanych artykułów i patentów wynika, że źródłem rozwiązań problemów technicznych są zarówno rośliny, jak i zwierzęta.

Bioinspiracje są przydatne na każdym etapie projektowania i rozwoju wyrobu czy procesu. W inżynierii pro-

dukcji bioinspiracje obejmują m.in. projektowanie lekkich i sztywnych konstrukcji, powierzchni roboczych oraz kształtu narzędzi i części maszyn o optymalnych właściwościach eksploatacyjnych (małym zużyciu, niewielkich oporach ruchu, zdolności do samoregeneracji itp.).

Możliwości wykorzystania bioniki w branży lotniczej i samochodowej oraz interdyscyplinarne zagadnienia projektowania konstrukcji lekkich były już prezentowane na łamach *Mechanika* [4, 5]. Niniejszy artykuł stanowi kontynuację tej tematyki; jest on poświęcony problemom projektowania powierzchni roboczych oraz narzędzi i części maszyn.

### Biologiczne inspiracje w projektowaniu struktury powierzchni

W przypadku powierzchni współpracujących należy starannie dobrać strukturę geometryczną i metalograficzną warstwy wierzchniej, twardość oraz rodzaj materiału. Od tych czynników zależy m.in. współczynnik tarcia i odporność na zużycie. Przy czym nie zawsze współpraca między powierzchniami gładkimi przebiega poprawnie. Potwierdzają to obserwacje zjawisk występujących w przyrodzie.

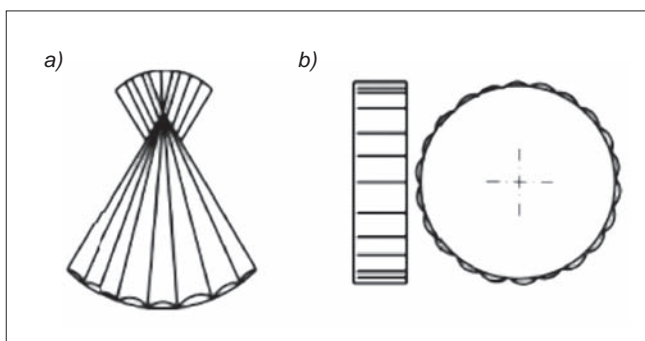
Organizmy żywe nie mają tzw. gładkich powierzchni. Ich pokrycie ukształtowało się w wyniku ewolucji ukierunkowanej na optymalne przystosowanie do warunków życia. Muszle skorupiaków (np. *Farrers scallop*) żyjących w środowisku wodnym nie są gładkie, ale prążkowane, co istotnie zwiększa ich sztywność, wytrzymałość i odporność na zużycie [3, 9]. Skóra rekina ma złożoną, niegładką strukturę redukującą opory ruchu [4]. Żuk gnojowy rozkopyje, rozdrabnia i przesuwa duże ilości ziemi. Aby zoptymalizować te działania, powierzchnie jego tułowia, głowy czy skrzydeł też nie są gładkie. Skrzydła mają strukturę prążkową, na głowie są liczne wypukłości, a w tułowiu – wgłębienia. Dzięki tym nierównościami opory związane z przemieszczaniem się w ziemi są mniejsze, a obecność powietrza czy wody umożliwia smarowanie, co również ułatwia poruszanie się, a także zwiększa odporność tułowia i głowy żuka na uszkodzenia oraz zużycie [7, 10]. Nawet tak delikatne elementy jak skóra czy skrzydła motyla nie są gładkie – mają specyficzną, łuskową strukturę, przystosowaną do latania. Motyle i ćmy z łuskowatymi skrzydłami są rekordzistami wśród owadów pod względem długości oraz prędkości lotu: motyl *Dunus plexippus* pokonuje 3200 km w trzy tygodnie, a ćma *Agrotis ipsilo* przemieszcza się z prędkością 113 km/h [8, 12].

### Przykłady rozwiązań technicznych zainspirowanych pokryciem ciała zwierząt

■ **Narzędzia do szlifowania.** Szlifowanie jest złożonym procesem stosowanym w obróbce wykończeniowej. W jego wyniku uzyskuje się wymaganą dokładność wymiarową i ostateczne właściwości warstwy wierzchniej

\* Prof. dr hab. inż. Adam Ruszaj (ruszaj@mech.pk.edu.pl) – Instytut Technologii Maszyn i Automatyki Produkcji na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej

wyrobu, które zależą od wielu czynników związanych z obrabiarką, parametrami szlifowania (prędkością, głębokością, posuwem) oraz narzędziem – ściernicą. Na bazie wieloletnich doświadczeń producenci ściernic potrafią dobrać ich właściwości (spoiwo, rodzaj ziarna, ziarnistość, strukturę) zapewniające uzyskanie wymaganej dokładności i właściwości warstwy wierzchniej wyrobu. Problemem otwartym pozostaje utrzymanie właściwości skrawnych ściernicy na tym samym poziomie podczas szlifowania – czyli zminimalizowanie jej zużycia. Obecnie problem ten rozwiązuje się poprzez optymalizację parametrów procesu oraz właściwości ściernicy. Istotne zwiększenie odporności ściernicy na zużycie można uzyskać dzięki modyfikacji jej powierzchni roboczej. Źródłem inspiracji były w tym przypadku muszle skorupiaków, a zwłaszcza prążkowana muszla *Farrers scallop* (rys. 1). Takie muszle wykazują nawet o 63% większą odporność na zużycie niż muszle gładkie [9].

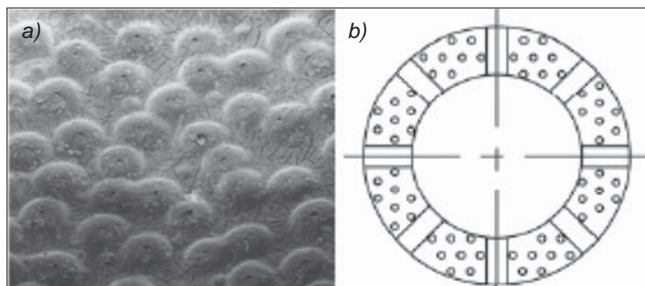


Rys. 1. Model struktury muszli skorupiak *Farrers scallop* (a); koncepcja konstrukcji ściernicy z falistą częścią roboczą (b) [3, 9]

Badania takich ściernic są w fazie laboratoryjnej. Przewiduje się, że narzędzia te będą się charakteryzować istotnie mniejszym zużyciem nie tylko ze względu na kształt, ale również dzięki lepszym warunkom usuwania ciepła, produktów szlifowania i zużytych ziaren ściernych z obszaru obróbki. Zastosowanie ściernic o powierzchni prążkowanej w praktyce wymaga jednak rozwiązania wielu problemów dotyczących ich produkcji, regeneracji i ostrzenia [9].

■ **Wiertła górnicze.** Niegładka powierzchnia głowy i tułowia oraz analiza zachowania żuka gnojowego zainspirowały projektantów wiertel górniczych [10].

W pracy wiertła górniczego można znaleźć liczne analogie do aktywności żuka. Wiertła powinny wydajnie wiercić (tak jak żuk powinien intensywnie kopać) oraz możliwie mało się zużywać (jak głowa i tułów żuka). Wykorzystując te podobieństwa, zaprojektowano wiertło z niegładkimi, samoregenerującymi się powierzchniami roboczymi (rys. 2, 3).



Rys. 2. Struktura powierzchni głowy żuka gnojowego (a) i schemat powierzchni roboczej wiertła (b) z zaznaczonymi ziarnami diamentu tworzącymi nierówności powierzchni [10]

Wytwarzanie części roboczej wiertła odbywa się w trzech etapach: ziarna diamentu są mieszane z materiałem osnowy i wlewane do formy, następnie przez 8 min są spiekane w temperaturze 980 °C i pod ciśnieniem 15 MPa, a na końcu chłodzi się je przez 24 h. Sekret zdolności do samoostrzenia powierzchni wiertła polega na odpowiednim dobraniu materiału osnowy i relacji jej zużywania się do szybkości wykruszania się fazy diamentowej. W momencie wyrywania ziaren diamentu osnowa powinna się tak zużywać, aby na bieżąco odsłaniać nowe, ostre ziarna diamentu.

Badania doświadczalne i eksploatacyjne wskazały, że stosowanie wiertel z bioniczną samoostrzącą się (samoregenerującą) powierzchnią roboczą pozwala na zwiększenie prędkości wiercenia o 43% przy zmniejszeniu zużycia nawet o 74%.

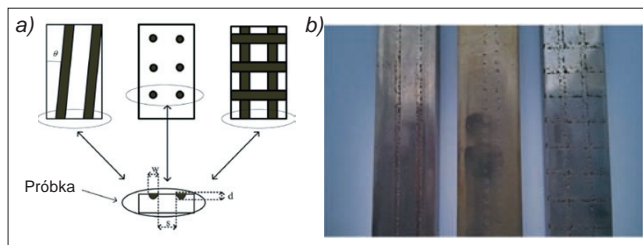


Rys. 3. Końcówka robocza wiertła górniczego z bioniczną strukturą powierzchni [7]

■ **Zwiększenie odporności na zużycie zmęczeniowe powierzchni z żeliwa szarego.** Szare żeliwo odlewnicze (np. GCI) jest często stosowane ze względu na stosunkowo niską temperaturę topnienia, bardzo dobre właściwości odlewnicze, dobrą odporność na zużycie i twardość. Aby zwiększyć wykorzystanie tego materiału, należałoby poprawić jego odporność na kruche pękanie i zużycie zmęczeniowe. Konieczne byłoby opóźnienie pojawiania się pęknięć oraz zahamowanie lub zmiana kierunku ich propagacji.

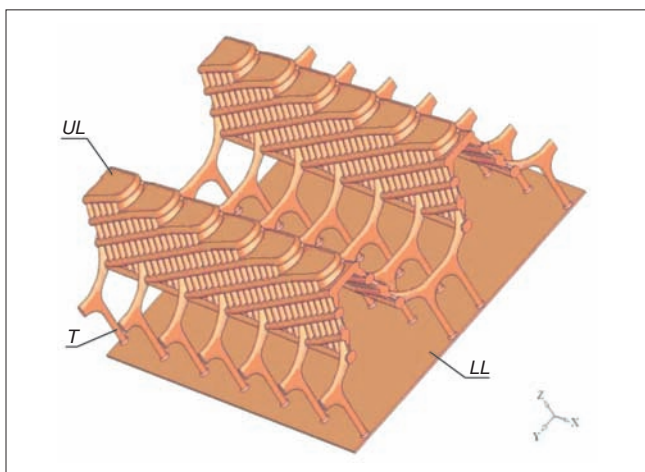
W tym celu opracowano specjalną, niegładką strukturę warstwy wierzchniej. Jako wzorec posłużyła powierzchnia skrzydeł (prążki) oraz głowy żuka gnojowego (wypukłości jak na rys. 2a). Bioniczną strukturę na powierzchni próbek z żeliwa szarego wykonano laserem Nd-Yag o długości fali 1,064 μm. W badaniach uwzględniono kilkanaście wariantów struktury bionicznej; najbardziej reprezentatywne z nich przedstawiono na rys. 4.

Porównanie próbek o powierzchniach bionicznych i płaskich wykazało, że te pierwsze charakteryzuje większa wytrzymałość zmęczeniowa; największy wzrost wytrzymałości zmęczeniowej (o 53%) wykazują próbki z bioniczną strukturą siatkową (kąt krzyżowania się rowków 60°). Wzrost wytrzymałości wynika przede wszystkim z opóźnienia pojawiania się mikropęknięć, hamowania ich propagacji oraz zmiany jej kierunku. W ten sam sposób można istotnie poprawić właściwości warstwy wierzchniej próbek stalowych [11].

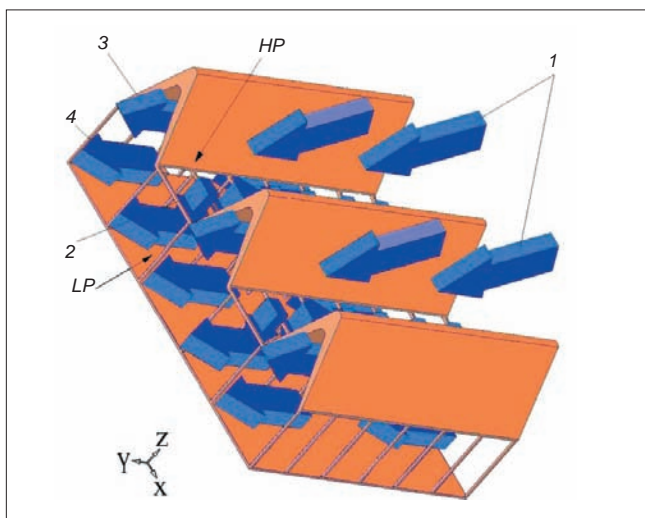


Rys. 4. Wybrane próbki ze strukturą bioniczną (a); widok powierzchni próbki z elementami struktury bionicznej (b) [10]

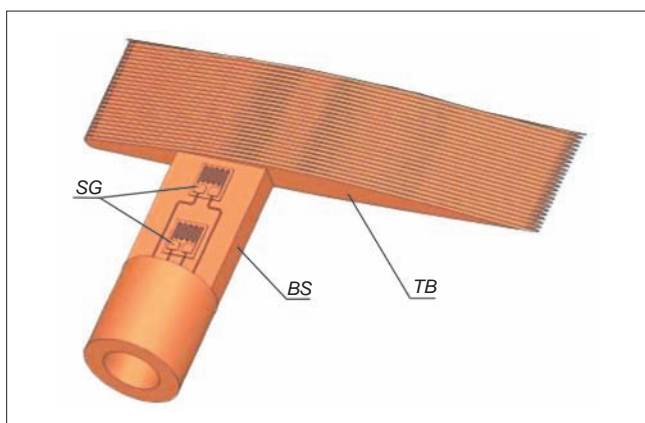
■ **Wzrost efektywności pracy elektrowni wiatrowych.** Źródłem inspiracji przy projektowaniu łopatek turbiny wiatrowej była budowa łuski ze skrzydła motyla. W łusce (rys. 5) występują wewnętrzne warstwy tworzące kanaliki, przez które w czasie lotu owada przepływa



Rys. 5. Przekrój łuski ze skrzydła motyla *Danaus plexippus*; UL – warstwa górną, LL – warstwa dolną, T – struktura podporowa [8, 12]



Rys. 6. Model metalowej warstwy bionicznej na powierzchni łopatki turbiny wiatrowej zainspirowanej przez strukturę skrzydła motyla oraz schemat przepływu powietrza przez mikrokanaliki, 1 – przepływ średni, 2 – powietrze zasysane, 3 – przepływ wtórny, 4 – wypływ powietrza, HP – wysokie ciśnienie, LP – niskie ciśnienie [8, 12]



Rys. 7. Model łopatki turbiny wiatrowej (TB) wykorzystany w badaniach w tunelu aerodynamicznym, BS – element sprężysty, SG – tensometryczny czujnik odkształcenia BS [12]

powietrze. Dzięki temu [12] rosną siły aerodynamiczne działające na skrzydła, a w konsekwencji – zwiększa się siła unosząca, zmniejszają się tarcie aerodynamiczne, wibracje oraz głośność lotu.

Te efekty umożliwiają motylowi precyzyjny i szybki lot, a zmniejszenie wibracji i głośności lotu pozwala mu uniknąć ataku napastnika. Tym samym rosną jego szanse na przeżycie.

Na podstawie budowy łuski ze skrzydła motyla (rys. 5) powstał model bioniczny struktury warstwy wierzchniej (*butterfly skin*) łopatki turbiny wiatrowej (rys. 6) oraz przeanalizowano przepływ powietrza przez kanaliki tej struktury.

Model łopatki turbiny wiatrowej przedstawiono na rys. 7. Grubość metalicznej warstwy bionicznej na powierzchni łopatki wynosi 1 mm i jest 333 razy większa od grubości warstwy na skrzydłach motyla (rys. 5).

Struktura bioniczna składa się z dwóch warstw. Górna warstwa metalowa z elementami w kształcie odwróconego „V” i dolna warstwa płaska tworzą kanał wypełniony warstwą powietrza o grubości ok.  $0,4 \pm 0,7$  mm. W ściankach górnej wykonano dużą liczbę rowków o głębokości 0,5 mm. W rowkach na zewnętrznej powierzchni górnej znajdują się otwory o wymiarach  $0,4 \times 0,4$  mm =  $0,16$  mm<sup>2</sup>, przez które powietrze wpływa do przestrzeni pomiędzy górną i dolną warstwą. Odległość pomiędzy krawędziami powierzchni w kształcie odwróconego „V” wynosi 1 mm.

Badania w tunelu aerodynamicznym wykazały, że siła ciągu łopatki o konstrukcji bionicznej wzrosła o 15% w stosunku do siły ciągu gładkiej łopatki. Zmniejszył się również opór aerodynamiczny i poprawiły się charakterystyki dynamiczne pracy turbiny. Innymi słowy, zastosowanie łopatek o powierzchni wzorowanej na łuskach ze skrzydeł motyla zdecydowanie poprawia efektywność pracy turbiny. Taka turbina przejmuje więcej energii wiatru w porównaniu z turbiną z gładkimi łopatkami, pracuje ciszej i charakteryzuje się większą żywotnością [8, 12].

### Biologiczne inspiracje w projektowaniu kształtu elementów

W przyrodzie nie występują idealnie gładkie powierzchnie, a także regularne kształty czy struktury wewnętrzne. Budowa drzew, krzewów i kości szkieletowych ssaków czy ptaków oraz organy organizmów żywych są dostosowane do warunków egzystencji [4, 5, 13, 14]. Klasycznym przykładem optymalnego kształtu jest *boxfish* – pokrój ryby o współczynniku oporu ruchu zaledwie 0,06, który był inspiracją do zbudowania bionicznego samochodu w firmie Mercedes [4].

### ■ Narzędzia do rozdzielania (cięcia) materiałów.

Wiele organizmów żywych ma ostre elementy, konieczne do obrony i przetrwania. Są to: igły kaktusa, klujki moskitów, zęby drapieżników lądowych i wodnych. Kilka bionicznych metod cięcia zostało opracowanych na bazie żądla moskita, zębów gryzoni oraz zębów piranii. Klujka moskita była wzorem dla strzykawki lekarskiej. Klujka składa się z zewnętrznej osłony (pochwy) pokrywającej wewnętrzny sztylet (ostrze), zaopatrzony w rząd ząbków (karców) po obu stronach. Te ząbki zwiększają efektywność ostrza tnącego przez zmniejszenie nacisku i stymulacji nerwów podczas ukłucia, dlatego początkowa faza ukłucia jest bezbolesna [3, 7].

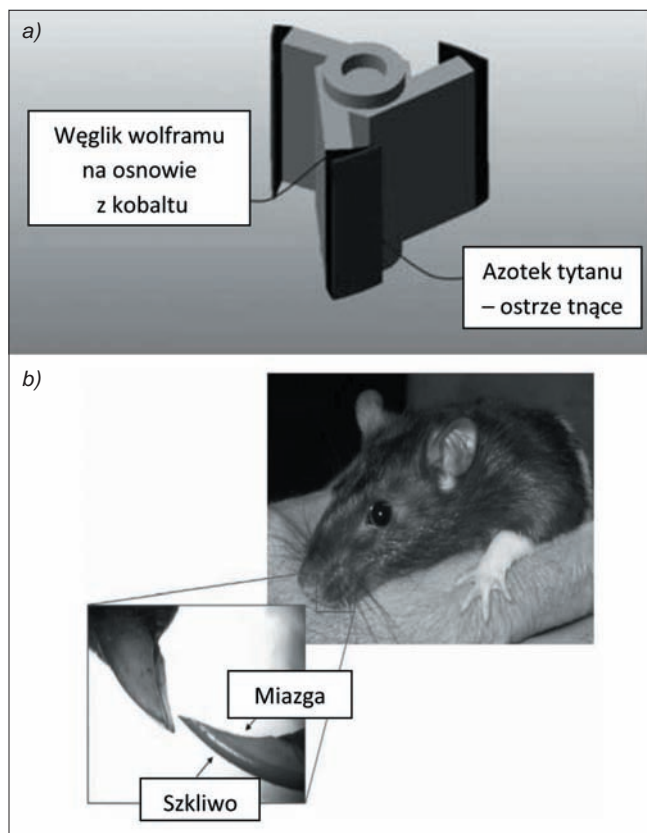
Kolejną bioinspiracją były zęby piranii. Wykorzystano je przy konstruowaniu nożyc chirurgicznych, które według





chirurgów wymagają użycia mniejszej siły (w stosunku do nożyc tradycyjnych), a krawędź przecięcia tkanki jest bardziej wyrównana [3, 7].

Gryzonie (np. szczury i króliki) mają samoostrzące się siekacze. Przy opracowywaniu niektórych narzędzi do cięcia wzorowano się na zębach szczura. Podczas żucia pokarmu najpierw zużywa się stosunkowo miękki tył zęba (miazga), odsłaniając nowe sekcje twardego szkliwa. Na tej podstawie zaprojektowano samoostrzące się ostrza niszczarki do papieru [3, 7]. Podczas pracy ostrza niszczarki najpierw zużywa się stosunkowo miękka jego część wykonana z węgla wolframu (na podstawie z kobaltu), odsłaniając twarde ostrze z azotku tytanu (jak szkliwo w zębach gryzonia). W ten sposób ostrze podlega ciągłemu procesowi samoostrzenia się (rys. 8).



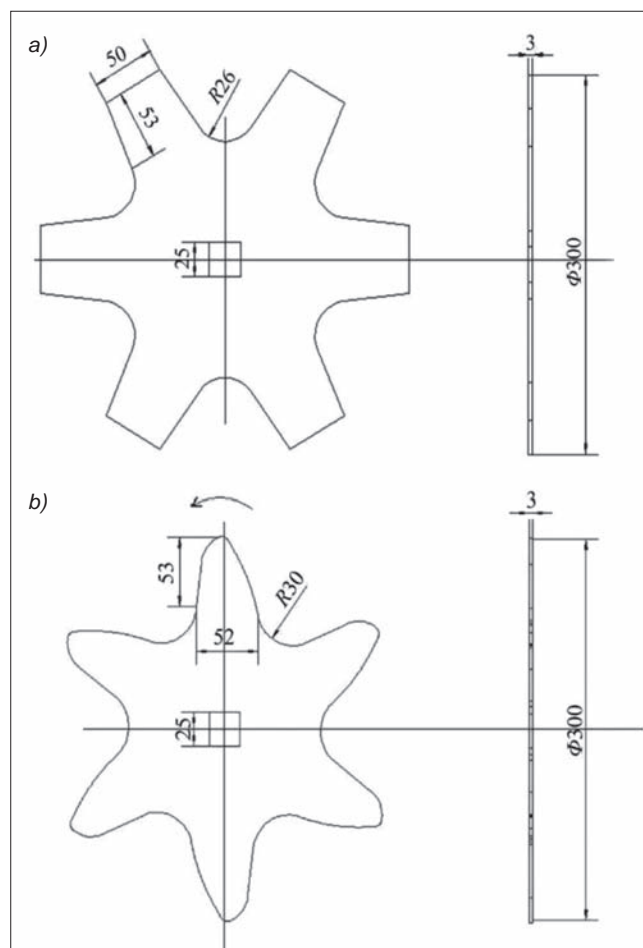
Rys. 8. Ostrze niszczarki do papieru (a) wzorowane na zębach szczura (b) [3, 7]

■ **Narzędzia rolnicze.** Narzędzia rolnicze powinny się charakteryzować dużą wydajnością i żywotnością oraz zużywać możliwie mało energii. Maszyny rolnicze pracują nawet po kilkanaście godzin dziennie, dlatego już niewielkie oszczędności energii właściwej przynoszą duże efekty ekonomiczne. Zmniejszenie zużycia energii może wynikać ze zmniejszenia oporów ruchu narzędzia w glebie, co zależy m.in. od kształtu narzędzia.

Stosunkowo prostym narzędziem jest tarcza tnąca w maszynach przeznaczonych do uprawy ściernisk. Takie maszyny pracują na dużych obszarach (np. w Chinach czy USA). Jako wzorec biologiczny tarczy tnącej wybrano łapy kreta (rys. 9).

Na podstawie analizy budowy przedniej łapy i palców kreta opracowano model bioniczny tarczy maszyny rolniczej. Modelowanie kształtu, oporów ruchu i naprężeń przeprowadzono metodą elementów skończonych. Projekt porównano z kształtem dotychczas stosowanej tarczy (rys. 10).

Rys. 9. Przednia łapa kreta [14]



Rys. 10. Modele tarczy tnącej maszyny rolniczej: a) konwencjonalny, b) bioniczny [14]

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że wypadkowe naprężenia (suma naprężeń normalnych i stycznych pochodzących od tarcia) w przypadku tarczy bionicznej są o ok. 34,33% mniejsze niż w tarczy standardowej. Naprężenia normalne są zaś o 22,64% mniejsze niż w tarczy standardowej. Z kolei naprężenia w glebie w wyniku oddziaływania tarczy bionicznej są o 6,87% większe niż podczas pracy tarczy standardowej, co zapewnia tarczy bionicznej większą efektywność rozdzielania i rozdrabniania wierzchniej warstwy, np. ścierniska [14].

Inspiracje biologiczne są przydatne również w projektowaniu maszyn budowlanych [15].

## Podsumowanie

Bionika pozwala na wykorzystanie w inżynierii produkcji rozwiązań wypracowanych przez naturę w trakcie ewolucji. Rozwiązania te są przydatne w projektowaniu

i produkcji elementów lotniczych, samochodowych czy obrabiarkowych (np. lekkich i sztywnych korpusów precyzyjnych obrabiarek, cienkościennych, sztywnych i wysoko wytrzymałych cylindrów, konstrukcji spawanych). Wagę tych zagadnień przedstawiono w [4, 5]. W niniejszym artykule opisano przykłady, które dowodzą, że w projektowaniu kształtu i struktury powierzchni części maszyn i narzędzi rozwiązania inspirowane kształtem i budową organów zwierząt (muszli skorupiaków, głowy, tułowia czy skrzydeł żuka gnojowego, skrzydeł motyla, kłujki moskitów, zębów piranii, zębów gryzoni czy łap kreta) umożliwiają dokonanie istotnego postępu przez:

- rozwój narzędzi (od narzędzi do szlifowania i wiercenia w branży górniczej, przez instrumenty medyczne, po ostrza niszczarek papieru i tarcze tnące maszyn rolniczych),
- rozwój turbin wiatrowych (dzięki zastosowaniu łopatek o strukturze warstwy wierzchniej wzorowanej na skrzydłach motyla; wydaje się, że analogiczne prace należy podjąć w obszarze turbin wodnych, cieplnych i lotniczych),
- poprawę właściwości warstwy wierzchniej i zwiększenie odporności na zużycie elementów z żeliwa szarego i stali stopowych (również w tym przypadku wydaje się, że analogiczne prace należy kontynuować w obszarach maszyn rolniczych i budowlanych, hutniczych i górniczych, w których występują elementy pracujące w bardzo trudnych warunkach i zmniejszenie ich zużycia byłoby źródłem istotnych efektów technicznych i ekonomicznych).

Wykorzystując inspiracje biologiczne w inżynierii produkcji, warto podkreślić, że często ich źródłem są organizmy uważane przez ludzi za bezużyteczne (żuk gnojowy), szkodliwe (moskity, kret, szczury), a nawet niebezpieczne (piranie, moskity). To powinno uczyć ludzi szacunku dla środowiska naturalnego i żyjących w nim organizmów.

#### LITERATURA

1. Lurie-Luke E. "Product and technology innovation: What can biomimicry inspire". *Biotechnology Advances*. 32 (2014); pp. 1494-1505.
2. Lothar W., Isenmann R., Moehrl M.G. "Bionic in patents – semantic-based analysis for the exploitation of bionic principles in patents". *Procedia Engineering*. 9 (2011); pp. 620-632.
3. Shu L.H., Ueda K., Chiu I., Cheong H. "Biologically inspired design". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 60 (2011); pp. 673-693.
4. Ruszaj A. „Bioinspiracja w rozwiązywaniu problemów technicznych”. Szkoła Naukowa Obróbek Erozyjnych – Artykuły naukowe z 2015 r. *Mechanik*. Nr 12 (2015); s. 255-260.
5. Ruszaj A. „Bioinspiracje w projektowaniu konstrukcji lekkich”. *Mechanik*. Nr 2 (2016); s. 88-92.
6. Grigorian M. "Biomimicry and Theory of Structures – Design Methodology Transfer from Trees to Moment Frames". *Journal of Bionic Engineering*. 11 (2014); pp. 638-648.
7. Gau K., Sun Y-H., Ren L-Q., Cao P-L., Li W-T., Fan H-K. "Design and analysis of ternary coupling bionic bits". *Journal of Bionic Engineering*. Suppl. (2008); pp. 53-59.
8. Kovalev I. "Butterfly Skin for Wind Turbines". [www.bioinspired.sinet.ca](http://www.bioinspired.sinet.ca).
9. Linke B.S., Moreno J. "New concept for bio-inspired grinding". *Journal of Manufacturing Processes*. 19 (2015); pp. 73-80.
10. Chen Z., Lu S., Song X., Zhang H., Yang W., Zhou H. "Effects of bionic units on the fatigue wear of grey iron surface with different shapes and distributions". *Optics & Laser Technology*. 66 (2015); pp. 166-174.
11. Lu J., Yang Ch., Zhang L., Feng A., Jang Y. "Mechanical properties and microstructure of bionic non-smooth stainless steel surface by laser multiple processing". *Journal of Bionic Engineering*. 6 (2009); pp. 180-185.
12. Kovalev I. "From butterfly to wind turbine". *Wind Engineering*. Vol. 34, No. 4 (2010); pp. 351-360.
13. Meyers M., Lin A., Olevsky E., Georgalis S. "The cutting edge: sharp biological materials". *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. Vol. 60, No. 3 (2008); pp. 19-24.
14. Li M., Chen D., Zhang S., Tong J. "Biomimetic design of a stubble – cutting disc using finite element analysis". *Journal of Bionic Engineering*. 10 (2013); pp. 118-127.
15. Zhang R., Chen B., Li J-q., Xu S-c. "DEM simulation of clod crushing by bionic bulldozing plate". *Journal of Bionic Engineering*. Suppl. (2008); pp. 72-78. ■